高地隙四轮独立驱动喷雾机路径跟踪模型预测控制

王子杰，刘国海*，张　多，沈　跃，姚　震，张　贺

（江苏大学 电气信息工程学院，江苏镇江，212013）

摘　要：针对传统燃油驱动、前轮转向的高地隙喷雾机传动效率低、碳排放高、环境污染、智能化水平低、灵活性差等问题，本研究提出了一种适用于无人驾驶的高地隙四轮独立驱动（Four Wheel Independent Drive，4WID）喷雾机。其采用混合动力、前后双转向桥的4WID，转向半径小，前后轮的运行轨迹高度一致，能够减少田间植保作业时的压苗现象。考虑水田极端作业环境下驱动轮的滑移、陷坑等问题，基于喷雾机线性时变的运动学模型（LTV），构建了考虑驱动轮滑移的分层路径跟踪控制。上层模型预测控制（Model Predictive Control，MPC）器根据预期路径、车辆当前位置，获得喷雾机的转向角和运动速度，实现路径跟踪。下层以模糊控制和积分分离PID控制构建驱动轮滑移控制器，从而实现路径跟踪、运动速度、驱动轮滑移的有效控制，提高了喷雾机在复杂作业环境中的稳定性和路径跟踪精度。采用Adams/Matlab的联合仿真结果表明，在复杂的工况条件下，喷雾机驱动轮的滑移率依然控制在±20%之内，防止驱动轮发生过度滑移对车速和转向角产生不良影响，有利于喷雾机稳定性的提升。本喷雾机能够快速准确地跟踪期望路径，与未考虑驱动轮滑移的控制相比，能够适应更加复杂的工作环境，跟踪精度有明显提升。

关键词：前后双转向桥；四轮独立驱动；模型预测控制；模糊控制；滑移；路径跟踪

中图分类号：S24　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**202105-SA006

引用格式：王子杰, 刘国海, 张多, 沈跃, 姚震, 张贺 . 高地隙四轮独立驱动喷雾机路径跟踪模型预测控制[J]. 智慧农业(中英文), 2021, 3 (3): 82-93.

WANG Zijie, LIU Guohai, ZHANG Duo, SHEN Yue, YAO Zhen, ZHANG He. Path following model predictive control of four wheel independent drive high ground clearance sprayer[J]. Smart Agriculture, 2021, 3 (3): 82-93. (in Chinese with English abstract)

1　引　言

当前，无人农机自动驾驶与无人作业成为未来智慧农业的一个重要研究方向[1]。农机装备已被列为“中国制造2025”的十大重点研究领域[2]。然而，目前绝大多数的农机装备采用燃油驱动、传统机械传动，存在传动效率低下、控制形式单一、转弯半径大、姿态控制难等问题，整体技术水平较为落后，而且普遍存在农机作业时间长、农机手劳动强度大以及安全隐患的问题[3]。无人驾驶农机借助卫星定位导航系统，能更好地适应复杂田间作业环境，显著提高农机作业精度，避免作业重复或遗漏，提高农业生产效率和智能化水平[4]。同时，能有效地降低农机手的劳动强度，减少人力成本，也可以避免在植保施药过程中人与农药可能的接触。

收稿日期：2021-05-15　修订日期：2021-06-07

基金项目：国家自然科学基金项目（51975260）

作者简介：王子杰（1997—），男，硕士研究生，研究方向为四轮独立驱动喷雾机控制。E-mail：2221907035@stmail.ujs.edu.cn。

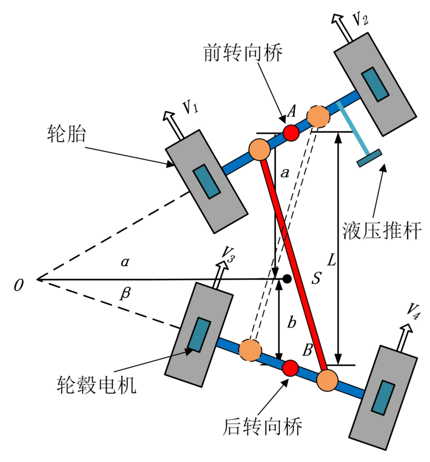
*通讯作者：刘国海（1964—），男，博士，教授，研究方向为智能农机装备控制和复杂非线性系统控制。电话：13505288982。E-mail：ghliu@ujs.edu.cn。

安全行驶和路径跟踪是无人驾驶农机核心研究问题，控制算法的优劣将直接影响农机自动导航的精准度和农机装备的稳定运行，进而影响到农机作业效果和生产效率。农业复杂的作业环境不仅会降低农机装备跟踪路径的精度，同时会对农机装备安全运行产生不良影响，甚至造成农机侧翻倾倒事故发生[5]。近年来，国内外研究者针对路径跟踪控制进行了深入的研究[6]。Song等[7]考虑纵向速度和道路曲率对低速复杂驾驶条件下喷雾机轨迹跟踪稳定性的影响，设计了时变模型预测控制（Model Predictive Control，MPC）器以提高轨迹跟踪精度。Liu等[8]提出了一种新的基于双连续投影法的无模型自适应控制算法来解决装置的横向跟踪控制问题。Lenain等[9]通过考虑扩展的运动学模型明确考虑了滑动效应问题，提出了一些依赖于自适应和预测性并基于观测器控制的发展，专用于农用拖拉机的自动引导。张华强等[10]提出了基于纯追踪算法的路径跟踪控制改进算法，通过群粒子算法实时确定纯追踪模型的前视距离，提升农机作业时的直线跟踪精度。王辉等[11]提出了一种基于预瞄追踪模型的农机导航路径跟踪控制方法，有效提高了农机对复杂路面的抗干扰能力。刘兆明等[12]针对雷沃高地隙喷杆喷雾机提出了一种以位置偏差和航向偏差为状态变量的直线路径跟踪控制算法，喷雾机能够自动完成直线、地头转弯行驶和喷雾作业。白国星等[13]从非线性模型预测控制出发，提出了两种实时性优化方案，保证控制器在跟踪曲率、航向变化较快的参考路径时的控制精度。刘正铎等[14]提出了一种基于非线性模型预测控制的路径跟踪控制方法，有效减小横向偏差。上述文献均未考虑复杂作业环境下，农机滑移对农机稳定运行程度和路径跟踪精度产生的影响。因此，克服农机在复杂恶劣多变作业环境下打滑、陷坑等问题，实现智能农机的稳定运行与高精度跟踪是农机路径跟踪控制的首要任务。为解决上述问题，课题组研制了一款四轮独立驱动（Four Wheel Independent Drive，4WID）高地隙喷雾机（图1）。其采用前后双转向桥、轮毂电机分布式4WID的底盘系统，如图2所示[15]，具有驱动力强、转向半径小等优点。液压推杆、连杆的辅助转向装置能保证喷雾机在泥泞田间或水田作业时，前后轮运行轨迹高度一致。以此4WID高地隙喷雾机为研究对象，采用MPC实现对其路径跟踪控制。同时考虑到喷雾机在泥泞田间作业时驱动轮滑移对路径跟踪控制的影响，加入模糊控制器对驱动轮的滑移率进行控制，提高路径跟踪精度。



图1　高地隙四轮独立驱动电动喷雾机

Fig. 1　High ground clearance four wheel independent drive (4WID) electric sprayer



注：V_1，V_2，V_3，V_4为四个车轮的线速度，α为前轴转向角，β为后轴转向角，L为车身长度，a为前转向桥到质心的距离，b为后转向桥到质心的距离，A是前转向桥的中点，B是后转向桥的中点，S是车辆质心

图2　前后双转向桥的4WID驱动底盘

Fig. 2　4WID drive chassis with front and rear double steering axles

2 喷雾机运动学模型

2.1 喷雾机差速转向运动学模型

高地隙4WID喷雾机通过独特的前后双转向桥结构、轮毂电机差速协同实现转向，转向半径小，且前后轮运行轨迹高度一致。喷雾机具体参数如表1所示。

表1 4WID高地隙喷雾机参数

Table 1 Parameters of 4WID high ground clearance sprayer

参数	数值
质量/kg	2170
宽度/m	1.95
长度/m	1.7
轮胎半径/m	0.47
驱动轮转动惯量/(kg·m^2)	0.66
连杆长度/m	1.49
喷杆长度/m	12
药箱容量/L	500
喷施量/(L·min^{-1})	5～10
最大转向角/(°)	24

通常情况下，喷雾机进行植保作业时，行驶速度较低，因此本研究不考虑喷雾机侧偏以及横摆的稳定性问题，仅考虑其路径跟踪问题。按照图2喷雾机底盘驱动结构，根据Ackermann-Jeantand转向原理[16]，可得喷雾机转向角和四驱动轮速度关系如公式（1）～（4）所示。

$$V_1 = V\left(\frac{1}{\cos\alpha} - \frac{W\tan\alpha}{2b}\right) \tag{1}$$

$$V_2 = V\left(\frac{1}{\cos\alpha} + \frac{W\tan\alpha}{2a}\right) \tag{2}$$

$$V_3 = V\left(\frac{1}{\cos\beta} - \frac{W\tan\beta}{2b}\right) \tag{3}$$

$$V_4 = V\left(\frac{1}{\cos\beta} + \frac{W\tan\beta}{2b}\right) \tag{4}$$

其中，α，β分别是喷雾机的前轴转向角和后轴转向角，(°)；a是前悬架中点到喷雾机质心的距离，m；b是后悬架中点到喷雾机质心的距离，m。喷雾机的底盘结构对称，在转向时前后桥转角相等，方向相反。V是喷雾机行进速度，m/s；V_1～V_4分别为喷雾机四个驱动轮的速度，m/s。通过控制喷雾机四个驱动轮的速度从而达到控制车速和转向运动，实现预期路径的跟踪。

由于喷雾机车的作业环境复杂，仅依靠四驱动轮的差速转向，在通过泥泞水田或陷坑路面时不能实现可靠转向并保证前后轮轨迹高度一致，因此采用了连杆及液压推杆的辅助转向装置，在复杂环境下也能减小转向角受到路面条件的影响。转向角δ_f和液压推杆长度l_t的关系如公式（5）所示。

$$\Delta l_t = \begin{cases} -0.00013\delta_f^2 + 0.025\delta_f & 0 \leqslant \delta_f \\ 0.000096\delta_f^2 + 0.0274\delta_f & \delta_f \leqslant 0 \end{cases} \tag{5}$$

2.2 喷雾机驱动轮动力学模型

在复杂的道路情况下，为了更好地分析驱动轮的状态，建立如图3所示的喷雾机驱动轮动力学模型。

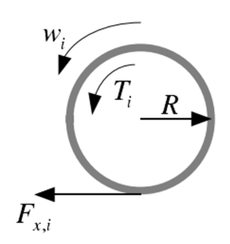


图3 喷雾机驱动轮动力学模型

Fig. 3 Dynamic model of sprayer driving wheel

忽略空气阻力等干扰，可以得到喷雾机驱动轮动力学方程，见公式（6）。

$$J\dot{w} = \boldsymbol{T}_i - RF_l - \boldsymbol{T}_b \tag{6}$$

驱动轮转矩可表示为：

$$\boldsymbol{T}_i = J\dot{w} + RF_l + \boldsymbol{T}_b \tag{7}$$

其中，$\dot{w}$为驱动轮角加速度，rad/s^2；$\boldsymbol{T}_i$为驱动转矩，N·m；R为驱动轮载荷半径，m；$\boldsymbol{T}_b$为滚动阻力矩，N·m；F_l为轮胎纵向力，N；J为驱动轮转动惯量，kg/m^2。如公式（8）所示，M是喷雾机驱动轮质量。

$$J = \frac{MR^2}{2} \tag{8}$$

2.3 喷雾机的线性时变运动学模型

选取喷雾机中心点的纵向速度作为整机纵向速度。选取喷雾机在全局坐标系下X轴的位置，Y轴的位置和航向角φ为状态量；喷雾机纵向速度v_r和转向角δ_f为控制量。喷雾机长度为l。基于

运动学原理，可得喷雾机整机速度、转向角、全局坐标系中位置关系如公式（9）所示。

$$\begin{cases} \dot{X} = v_r \cos\varphi \\ \dot{Y} = v_r \sin\varphi \\ \dot{\varphi} = \dfrac{2v_r \tan\delta_f}{l} \end{cases} \tag{9}$$

选取状态量$\boldsymbol{x}$=［X，Y，φ］^{T}，控制量$\boldsymbol{u}$=［v_r，δ_f］^{T}，则喷雾机状态空间方程为：

$$\dot{x} = f(x, \boldsymbol{u}) \tag{10}$$

为简化模型，将模型线性化，选取参考状态量x_{ref}，利用泰勒公式在x_{ref}处展开，将公式（10）改写为增量形式，可得到如公式（11）所示关于状态量x误差$\tilde{x}$的状态空间方程。

$$\dot{\tilde{x}} = \dot{x} - \dot{x}_{ref} = \frac{\partial f}{\partial x}(x - x_{ref}) + \frac{\partial f}{\partial u}(u - u_{ref}) = \boldsymbol{A}\tilde{x} + \boldsymbol{B}\tilde{u} \tag{11}$$

其中，$\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{B}$分别为f关于x、u的雅可比矩阵。

通过前向欧拉法将公式（11）离散化，此喷雾机运动学模型可近似视为一个线性时变（Linear Time-Varying Systems，LTV）系统，如公式（12）所示。

$$\dot{\tilde{x}} = \frac{\tilde{x}(k+1) - \tilde{x}(k)}{T} = \boldsymbol{A}\tilde{x}(k) + \boldsymbol{B}\tilde{u}(k) \tag{12}$$

可得，

$$\tilde{x}(k+1) = (I + T\boldsymbol{A})\tilde{x}(k) + \tau\boldsymbol{B}\tilde{u}(k) = \boldsymbol{A}_{k,t}\tilde{x}(k) + \boldsymbol{B}_{k,t}\tilde{u}(k) \tag{13}$$

其中，

$$\boldsymbol{A}_{k,t} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -Tv_r\sin\varphi \\ 0 & 1 & Tv_r\cos\varphi \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{B}_{k,t} = \begin{bmatrix} T\cos\varphi & 0 \\ T\sin\varphi & 0 \\ \dfrac{2T\tan\delta_f}{l} & \dfrac{2Tv_r}{l\cos^2\delta_f} \end{bmatrix}$$

3 LTV-MPC路径跟踪控制

采用如图4所示的分层控制结构控制喷雾机跟踪路径，上层控制器采用线性时变模型预测控制（LTV-MPC）实现喷雾机跟踪路径，下层控制器中考虑驱动轮滑移对喷雾机跟踪精度的影响，采用模糊控制对驱动轮的滑移率进行控制，通过积分分离式PID控制减少喷雾机在启动过程中所产生的较大滑移率。

3.1 路径跟踪的MPC

MPC具有系统考虑预测信息和处理多约束优化问题的能力，被广泛应用于无人驾驶的路径跟踪控制上[17,18]，MPC算法拥有“前馈+反馈”的控制结构，将参考输入序列作为未来参考输入的前馈，将系统状态值作为状态反馈补偿，通过在线求解，预测未来是否会出现违反约束的情况发生从而提前采取适度的控制作用，并通过滚动优化，求解有限时域内相对容易的开环优化问题，从而得到闭环控制[19]。

为防止出现系统的控制量突变，影响喷雾机路径跟踪精度和稳定性，用控制量增量取代控制量。修改后的状态方程表现形式如下。

$$\boldsymbol{\zeta}(k|t) = \begin{bmatrix} \tilde{x}(k|t) \\ \tilde{u}(k-1|t) \end{bmatrix} \tag{14}$$

其中，$k|t$表示t时间对k时间的预测。

设置系统的状态量如公式（15）所示。

$$\boldsymbol{\eta}(k) = \tilde{c}_{k,t}\zeta(k|t) \tag{15}$$

其中，$\boldsymbol{\eta}$=［X，Y，φ］^{T}为离散系统的输出量。X为喷雾机横轴位置，m；Y为纵轴位置，m；φ为喷雾机航向角，(°)。

可得到用于MPC的状态空间方程。

$$\begin{cases} \boldsymbol{\zeta}(k+1) = \tilde{\boldsymbol{A}}\boldsymbol{\zeta}(k) + \tilde{\boldsymbol{B}}\Delta u(k) \\ \boldsymbol{\eta}(k) = \tilde{\boldsymbol{c}}_{k,t}\boldsymbol{\zeta}(k|t) \end{cases} \tag{16}$$

其中，

$$\Delta u(k) = \tilde{u}(k) - \tilde{u}(k-1) \tag{17}$$

$$\tilde{\boldsymbol{A}} = \begin{bmatrix} A_{k,t} & B_{k,t} \\ O_{m\times n} & I_m \end{bmatrix} \tag{18}$$

$$\tilde{\boldsymbol{B}} = \begin{bmatrix} B_{k,t} \\ I_m \end{bmatrix} \tag{19}$$

$$\tilde{\boldsymbol{c}}_{k,t} = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{20}$$

其中，m=2是控制量维度；n=3是状态量维

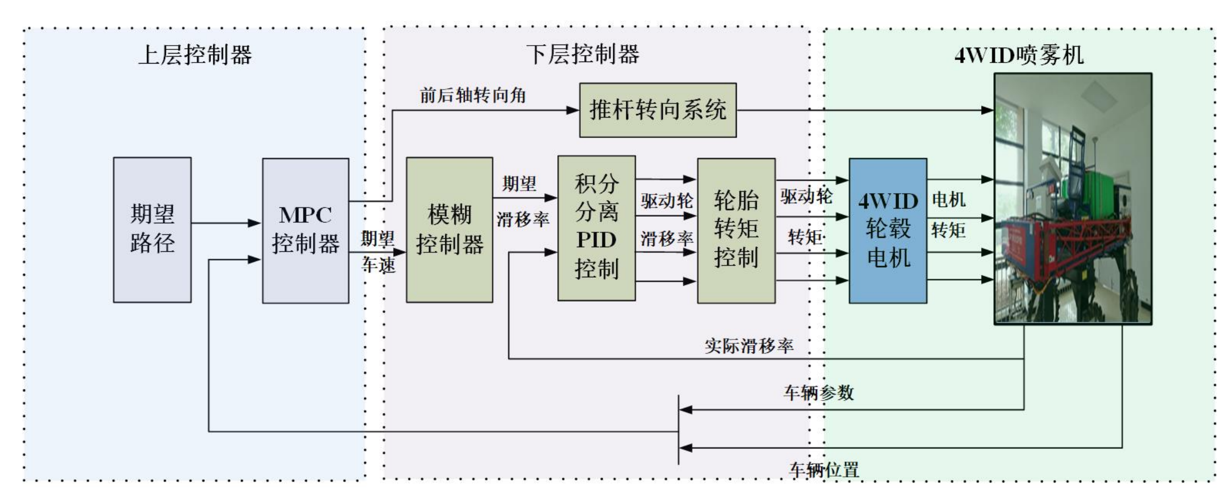


图 4　分层的 MPC 框图

Fig. 4 Hierarchical model predictive control block diagram

度，k_1、k_2、k_3为三个状态量误差的权重比。$\boldsymbol{A}_{k,t}$，$\boldsymbol{B}_{k,t}$含义与公式（13）相同，$\tilde{c}_{k,t}$为系统的输出矩阵。

考虑到实际喷雾机中采用液压推杆实现转向，其本身具有较大的响应时间。同时，低速行驶的农药喷洒作业对系统动态性能要求并不高，而对作业路径跟踪精度的要求较高，MPC 输出转向角如出现较大超调势必会影响路径跟踪精度。考虑到以上两种因素，在 MPC 器设计时，通过控制量及增量的约束，以符合喷雾机转向系统的实际情况，同时避免转向角出现较大超调，利于喷雾机路径跟踪精度的提升。

进一步引入松弛因子ε，防止无可行解的情况的发生[20]。设置目标函数如公式（21）[21]所示。

$$J(t)=\sum_{i=1}^{N_p}\left\|\eta(t+i|t)-\eta_{ref}(t+i|t)\right\|_Q^2+\sum_{i=1}^{N_c-1}\left\|\Delta U(t+i|t)\right\|_R^2+\rho\varepsilon^2=(Y-Y_{ref})^T\boldsymbol{Q}(Y-Y_{ref})+\Delta u^T\boldsymbol{R}\Delta u+\rho\varepsilon^2 \tag{21}$$

其中，N_p是系统的预测时域；N_c是系统的控制时域；$\boldsymbol{Q}$为系统状态量的权重矩阵；$\boldsymbol{R}$为系统控制量的权重矩阵。$\Delta\boldsymbol{U}$为控制量增量矩阵，η为系统的输出量。

综上考虑，设置目标函数的约束条件如下。

$$\begin{aligned}
&\min J(\zeta,u(t-1),\Delta u,\varepsilon)\\
&st.\ \zeta(k+1|t)=\tilde{A}\zeta(k|t)+\tilde{B}\Delta u && k=t,t+1,\ldots\ldots N_p-1 && (a)\\
&\eta(k|t)=c_{k,t}\zeta(k|t) && k=t,t+1,\ldots\ldots N_p && (b)\\
&u(k)=u(k-1)+\Delta u(k) && k=t,t+1,\ldots\ldots N_c-1 && (c)\\
&u_{\min}(t+k)\leqslant u(t+k)\leqslant u_{\max}(t+k) && k=0,1,2\ldots\ldots N_p && (d)\\
&\Delta u_{\min}(t+k)\leqslant \Delta u(t+k)\leqslant \Delta u_{\max}(t+k) && k=0,1,2\ldots\ldots N_p && (e)\\
&\Delta u(k)=0 && k=t+N_c,\ldots\ldots N_p && (f)\\
&\varepsilon>0
\end{aligned} \tag{22}$$

其中，（a）为系统的离散线性时变运动学模型，（b）为系统的状态量，（c）为系统的控制量，（d）为控制量约束，（e）和（f）为控制量增量约束。

3.2 基于LTV-MPC的控制器设计

将预测方程进行迭代，设置系统的预测输出，如公式（23）～（26）所示。

$$Y(t)=\Psi_t\zeta(t|t)+\theta_t\Delta U(t) \tag{23}$$

$$\boldsymbol{Y}=\begin{bmatrix}\eta(t+1|t)\\ \eta(t+2|t)\\ \vdots\\ \eta(t+N_p|t)\end{bmatrix} \tag{24}$$

$$\boldsymbol{\Psi}_t=\begin{bmatrix}\tilde{c}_{t,t}\tilde{\boldsymbol{A}}_{t,t}\\ \tilde{c}_{t,t}\tilde{\boldsymbol{A}}^2_{t,t}\\ \vdots\\ \tilde{c}_{t,t}\tilde{\boldsymbol{A}}^{N_p}_{t,t}\end{bmatrix} \tag{25}$$

$$\boldsymbol{\theta}_t=\begin{bmatrix}c_{t,t}\tilde{\boldsymbol{B}}_{t,t} & 0 & \cdots & 0\\ c_{t,t}\tilde{\boldsymbol{A}}_{t,t}\tilde{\boldsymbol{B}}_{t,t} & c_{t,t}\tilde{\boldsymbol{B}}_{t,t} & \cdots & 0\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ c_{t,t}\tilde{\boldsymbol{A}}^{N_p-1}_{t,t}\tilde{\boldsymbol{B}} & \tilde{\boldsymbol{A}}^{N_p-2}_{t,t}\tilde{\boldsymbol{B}}_{t,t} & \cdots & c_{t,t}\tilde{\boldsymbol{A}}^{N_p-N_c-1}_{t,t}\tilde{\boldsymbol{B}}_{t,t}\end{bmatrix} \tag{26}$$

其中，N_p为预测时域；$\Delta\boldsymbol{U}$为控制量增量矩阵；$\boldsymbol{Y}$为系统的输出量矩阵；$\boldsymbol{\Psi}_t$和$\boldsymbol{\theta}_t$为方程的迭代矩阵。

为便于使用MATLAB对目标函数二次规划求解，将公式（21）转化成公式（27）所示的标准形式。

$$J(t)=\frac{1}{2}\boldsymbol{X}^T H X+\boldsymbol{f}^T X \tag{27}$$

公式（21）进行转化的具体表现形式如公式（28）所示。

$$J(t)=\begin{bmatrix}\Delta\boldsymbol{U}^T & \varepsilon\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{\theta}^T\boldsymbol{Q}\theta+R & 0\\ 0 & \rho\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta U\\ \varepsilon\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}2\boldsymbol{E}^T\boldsymbol{Q}\theta & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta U\\ \varepsilon\end{bmatrix} \tag{28}$$

其中，$E=\Psi_t\zeta(t|t)$。ε为松弛因子；$\boldsymbol{Q}$为系统状态量的权重矩阵；Y，Ψ_t，θ_t含义与公式（23）相同。由于△$\boldsymbol{U}$无法对E进行控制，在求解二次规划过程中忽略$E^T\boldsymbol{Q}E$项。为简化计算，将控制序列中的第一个控制量输出给被控系统，作为实际的控制量。在下一个采样时刻（T+1时刻）重复上述步骤，实现滚动优化。

3.3 驱动轮滑移率的模糊控制

喷雾机驱动轮在转向及复杂的作业环境下产生较大的滑移[21,22]，往往会对喷雾机稳定运行程度和路径跟踪精度会产生不利影响，因此需要考虑驱动轮滑移对路径跟踪精度造成的影响[23]。

3.3.1 驱动轮滑移率分析

在Adams/Car中搭建轮胎特性实验平台，测量轮胎滑移率与轮胎纵向力之间的关系。设置驱动轮的纵向侧偏刚度C_l=10,000，横向侧偏刚度C_α=8000。并通过Adams/Car中的Tire Testrig模块确定驱动轮纵向力和滑移率关系，如图5所示。

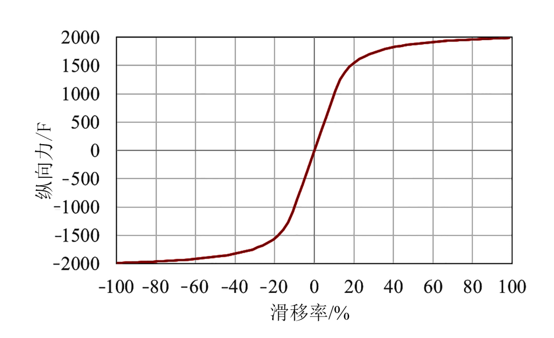


图5 喷雾机驱动轮纵向力与滑移率关系

Fig. 5 Relationship between longitudinal force and slip

由图5可知，驱动轮滑移率在±20%之内，轮胎纵向驱动力与滑移率近似呈线性关系，可近似表示为公式（29）。

$$F_l=C_l s \tag{29}$$

其中，F_l为驱动轮轮胎纵向力，N；s为滑移率，%，其定义为：

$$s=\frac{Rw-v}{\max(Rw,v)} \tag{30}$$

其中，R，w，v含义与公式（6）相同。

将公式（29）和公式（30）代入公式（7），可得：

$$T_i=J\dot{w}+RC_l s+T_b \tag{31}$$

公式（31）中各指标含义和公式（7）相同。

在田间复杂作业环境下，应控制轮毂电机输出的驱动力矩，将驱动轮的滑移率控制在±20%内，一方面喷雾机可充分利用作业路面的附着条件获得较大纵向驱动力；另一方面，可有效避免由于驱动轮打滑空转而产生的“刨坑”现象，导致喷雾机整机沉陷或侧倾的危险概率增加。

3.3.2 模糊控制器设计

模糊控制器中将喷雾机的速度偏差$e\in[-1,1]$

作为模糊控制器输入，输出变量$u\in[-0.2，0.2]$作为喷雾机轮胎的期望滑移率s。经过模糊量化处理，根据隶属度函数建立模糊语言变量和论域之间的关系。e和u的论域与七个量化等级的隶属度函数，如图6所示。控制规律为“if A，then B”形式，采用Mamdani法建立模糊控制规则库（表2）。采用MIN-MAX-重心法进行去模糊化，转化为精确量输出。

{NB，NS，0，PS，PB}

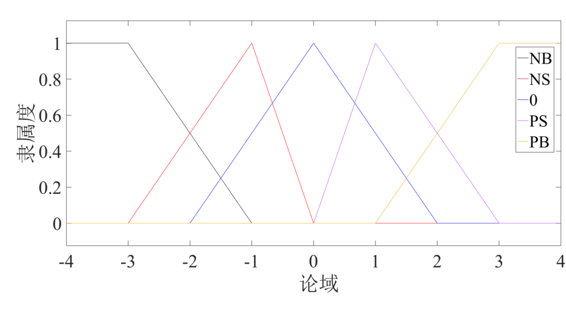


图6　e和u的隶属函数

Fig. 6 Membership functions of e and u

表2　模糊控制规则表

Table 2 Fuzzy control rules

模糊量	模糊子集				
e	NB	NS	0	PS	PB
u	PB	PS	0	NS	NB

4　仿真结果与分析

运用MATLAB/Simulink搭建基于LTV-MPC的控制器和滑移模糊控制器，与Adams View搭建的喷雾机模型进行联合仿真。MPC器参数设置如表3所示。积分分离PID控制器参数设置如表4所示。

本研究以对开路面的U型路径和3D随机路面的8字形路径两种工况进行了分析。

4.1 工况一：对开路面的U型路径跟踪

设置喷雾机左右驱动轮的路面附着系数分别为0.3和0.7的对开路面[24]。参考路径依然为连续的U型弯，半径为10 m。

图7为对开路面的U型路径喷雾机驱动轮的滑移率。在路面附着系数发生变化的情况下，仅

表3　模型预测控制器参数

Table 3 Model predictive controller parameters

MPC器参数	数值
采样时间/s	0.05
控制时域N_c	30
预测时域N_p	60
权重矩阵$\boldsymbol{Q}$	$200\times I_m$
权重矩阵$\boldsymbol{R}$	$30\times I_n$
车轮转角上限/rad	0.436
车轮转角下限/rad	−0.436
车轮转角增量上限/rad	0.05
车轮转角增量下限/rad	−0.05
松弛因子	100

表4　积分分离PID控制器参数

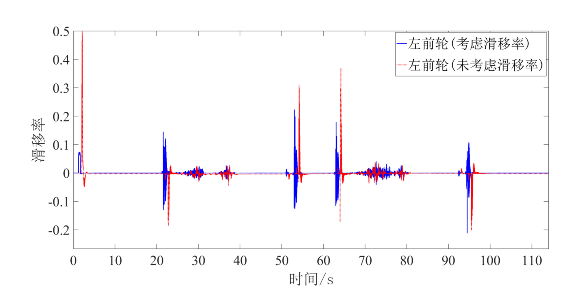
Table 4 Integral separation PID controller parameters

控制器参数	数值
采样时间/s	0.05
阈值ε	0.1
比例控制k_p	5
积分控制k_i	1.6
微分控制k_d	0.8

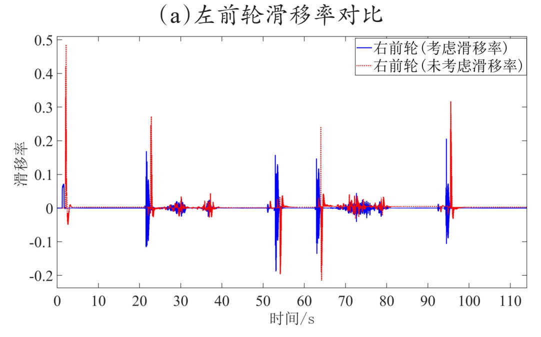
依靠LTV-MPC，在喷雾机启动和转向的过程中，由于其左右轮所处作业路面附着系数不一致，导致两侧驱动轮所受力大小不一致，驱动轮会发生较大的滑移，最大滑移率达到50%；加入滑移率模糊控制器后，在启动和转向的过程中，能将滑移率控制在±20%之内。

图8为对开路面情况下喷雾机前轮转向角。仅依靠LTV-MPC，在喷雾机启动和转向过程中，驱动轮滑移致使喷雾机转向角会产生较大超调，对喷雾机的稳定性和跟踪进度产生不良影响；加入滑移率模糊控制器后，能够减少转向角的超调，实际转向角为±4.866°。

喷雾机在对开路面情况下的横向偏差和跟踪的实际情况如图9和图10所示。在对开路面情况下跟踪路径的过程中，驱动轮滑移对喷雾机横向偏差产生影响。仅依靠LTV-MPC，在喷雾机启动和转向过程中，驱动轮滑移致使喷雾机转向角会产生较大超调，因而对整机的路径跟踪精度产生影响，最大横向偏差为0.032 m；加入滑移率模糊控制器后，能够减少转向角的超调，最大横



(a)左前轮滑移率对比



(b)右前轮滑移率对比

图 7 对开路面驱动轮滑移率对比

Fig. 7 Comparison of driving wheel slip rates on off road

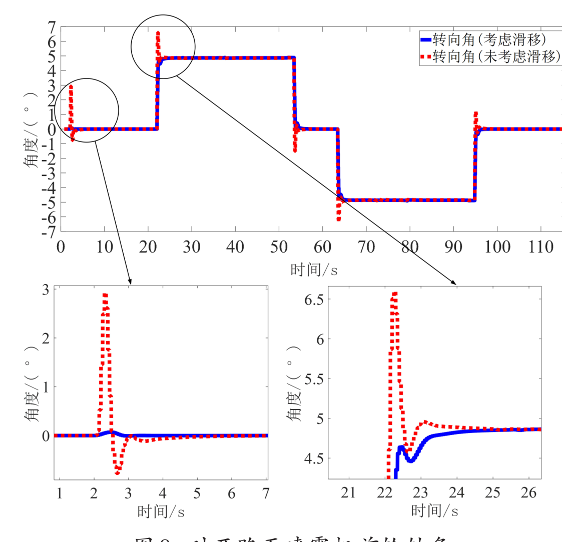


图 8 对开路面喷雾机前轮转角

Fig. 8 Front wheel angle of sprayer on off road

向偏差为 0.018 m，提高了喷雾机在复杂作业环境中路径的跟踪精度。

4.2 工况二：3D 随机路面的 8 字形路径跟踪

为进一步测试路径跟踪控制在真实复杂作业路面下的有效性，基于路面不平程度分类标准[25]和 Adams 的三维（3D）路面节点算法[26]，

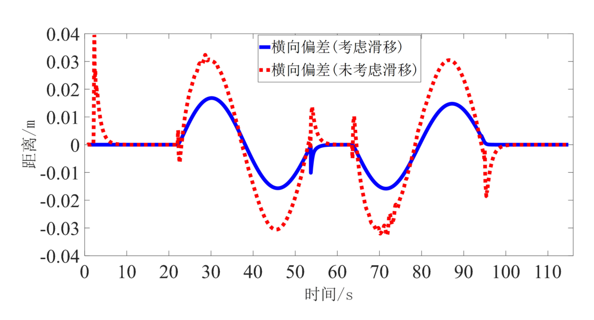


图 9 对开路面喷雾机横向偏差

Fig. 9 Sprayer lateral deviation on off road

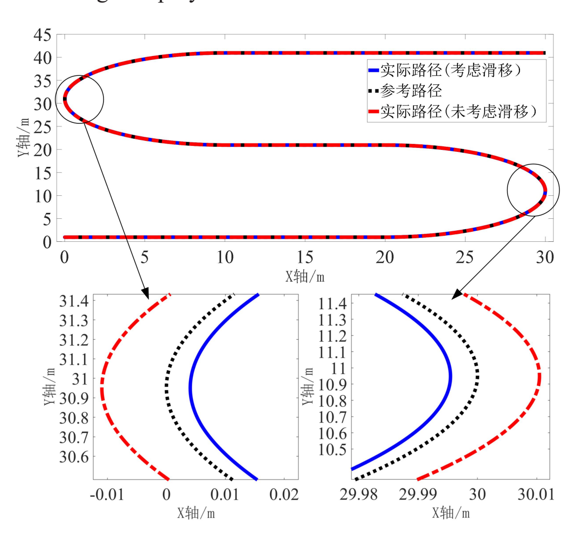


图 10 对开路面情况参考路径与实际路径

Fig. 10 Reference path and actual path on off road

在 MATLAB 中生成如图 11 所示的 C 等级随机路面模型。在 3D 路面上，进行 8 字型路径跟踪的联合仿真。

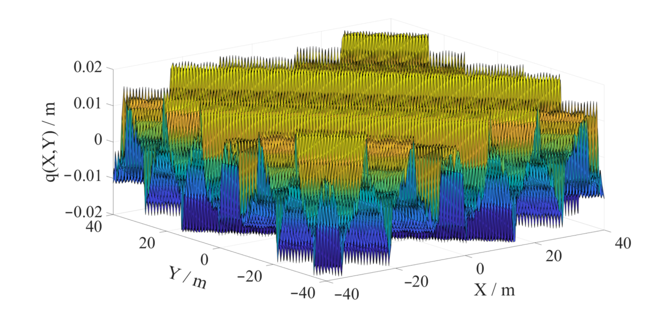


图 11 C 级平整度随机路面

Fig. 11 Random pavement with c-level roughness

在 C 等级随机路面情况下喷雾机驱动轮的滑移率如图 12 所示。由于路面起伏不平，驱动轮和地面的接触面积减小，更易导致驱动轮产生过

度滑移，降低喷雾机的稳定性和跟踪性能。在启动过程中，喷雾机产生±20%左右的滑移率，在跟踪直线的过程中，由于路面平整度发生变化，驱动轮的滑移率有一定波动，但能控制在±20%之内；在转向的过程中，由于存在侧倾作用对喷雾机稳定性产生影响，驱动轮的滑移率有较大波动，滑移率能够基本保持在±20%内。

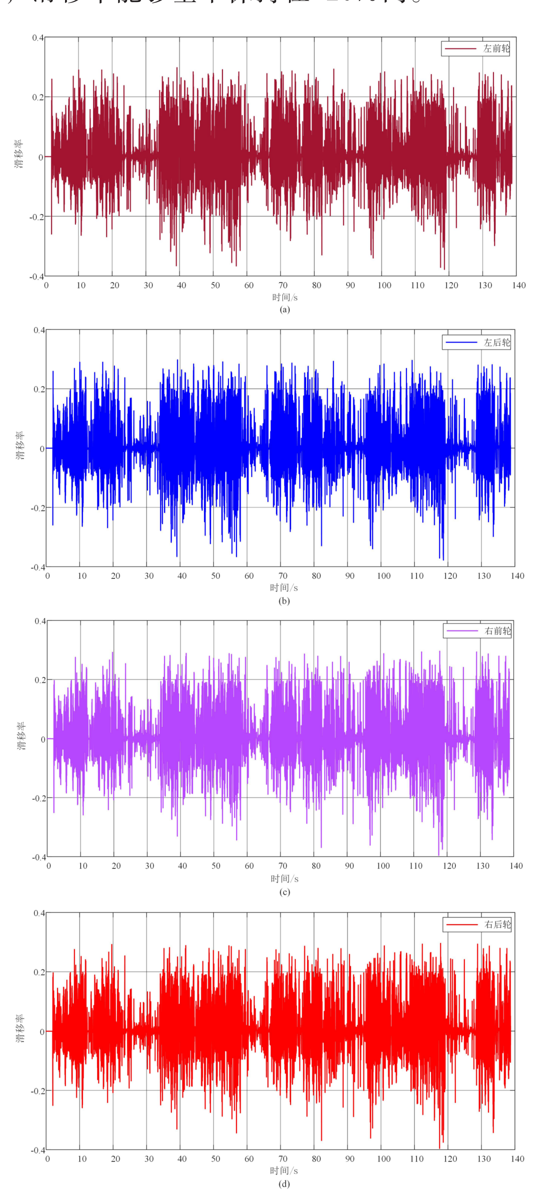


图 12　C级平整度随机路面下驱动轮滑移率

Fig. 12 Driving wheel slip rate with c-level roughness

C级平整度随机路面情况下喷雾机的车速和转向角的波形如图13和图14所示。驱动轮发生滑移会对车速和转向角产生影响。由于路面不平整，在跟踪路径的过程中，喷雾机的速度和转向角会发生波动，但控制算法能够及时对驱动轮转矩和转向角进行调整，控制喷雾机的车身姿态，防止喷雾机偏离预期的参考路径。转向角的波动较大，最大转向角为7.71°。

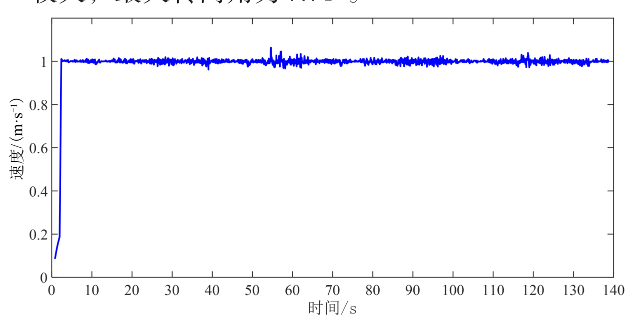


图 13　C级平整度随机路面下喷雾机速度

Fig. 13 Sprayer speed of c-level roughness road

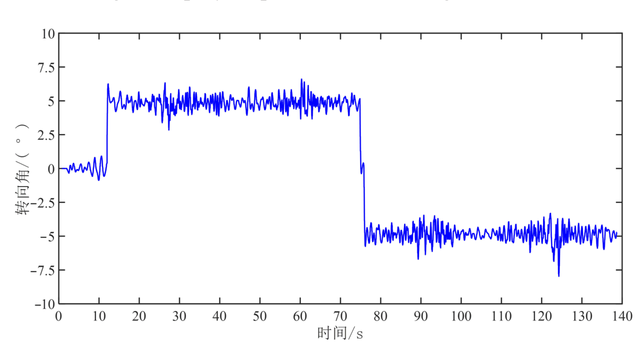


图 14　C级平整度随机路面下喷雾机转向角

Fig. 14 Sprayer steering angle of c-level roughness road

C级平整度随机路面情况下的喷雾机的横向偏差如图15所示。在启动过程中，喷雾机产生较大的滑移率，导致车速和转向角发生波动。因此在跟踪直线的过程中，喷雾机横向偏差发生波动，最大横向偏差0.0057 m。喷雾机在转向的过程中，由于路面不平整，存在侧倾作用对喷雾机稳定性产生影响，转向角连续波动导致喷雾机的横向偏差偏大，最大横向偏差为0.058 m。在C级平整度随机路面情况下的跟踪路径结果如图16所示。喷雾机在复杂的工况条件下依然能够准确的跟踪期望路径，通过控制驱动轮的滑移率，防止驱动轮出现打滑空转，提高了喷雾机的稳定性和控制精度。结果表面该控制算法能够满足复杂工况条件的要求。

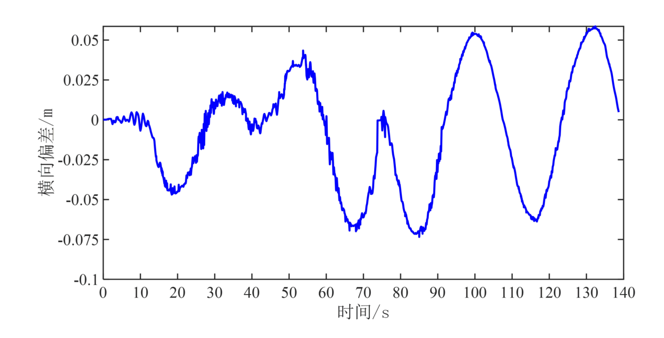


图 15 C级平整度随机路面下喷雾机横向偏差

Fig. 15 Lateral deviation of sprayer of c-level roughness road

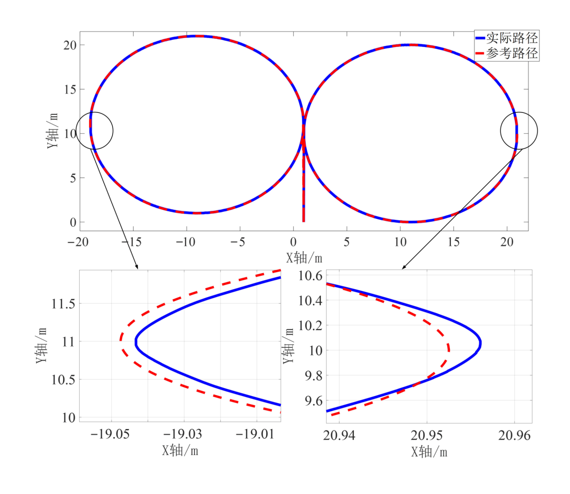


图 16 C级平整度随机路面下参考路径与实际路径

Fig. 16 Reference path and actual path of c-level roughness road

5 结 论

本研究针对4WID高地隙喷雾机独特的前后双转向桥与4WID的同步转向结构，分析并建立了基于MPC的LTV运动学模型；考虑到驱动轮发生过度滑移会降低喷雾机的稳定性和跟踪路径精度，以MPC和模糊滑移率控制构成了分层的4WID喷雾机的路径跟踪控制策略，提高喷雾机在泥泞湿滑等复杂农田作业环境下的路径跟踪精度。Adams/Matlab仿真结果表明，本研究提出的基于LTV-MPC和滑移模糊控制的控制器在复杂作业工况下，控制喷雾机的稳定性和跟踪精度均优于仅依靠LTV-MPC方式就行控制，能够减少喷雾机转向角的超调，快速精准地控制车速和转向角，同时将驱动轮滑移率控制在±20%之内，有效减少了跟踪路径的横向偏差，提高了喷雾机在复杂作业环境下的路径跟踪精度。

后续将搭建日本艾安得A&D控制仪表（A&D5436）实验平台对本研究提出的路径模型预测控制进行实验验证。同时将进一步讨论喷雾机由于垂直载荷的变化产生的侧倾对喷雾机的稳定性和控制精度的影响并在模型中加入针对侧倾的综合等效约束。

参考文献：

[1] VOUGIOUKAS S, ARVANITIS K, SIGRIMIS N. A nonlinear model predictive tracking controller for agricultural vehicles[C]// 2007 European Control Conference (ECC). Piscataway, New York, USA: IEEE, 2007: 4937-4943.

[2] 李金刚. 以农机化转型升级推进中国制造2025的相关思考[J]. 时代农机, 2019, 46(6): 10-11.
LI J. Thoughts on promoting made in China 2025 with agricultural mechanization transformation and upgrade[J]. Times Agricultural Machinery, 2019, 46(6): 10-11.

[3] 黄腾达, 蒋蘋, 胡文武, 等. 田间管理机路径跟踪系统设计及试验[J]. 浙江大学学报, 2020, 46(4): 509-518.
HUANG T, JIANG P, HU W, et al. Design and experiment of path tracking system of field management machine[J]. Journal of Zhejiang University, 2020, 46(4): 509-518.

[4] 郑巍, 黄盛杰, 刘斌. 浅析北斗卫星导航系统在农业工程中的发展和应用[J]. 农业装备与车辆工程, 2020, 58(7): 143-144.
ZHENG W, HUANG S, LIU B. Analysis on development and application of Beidou positioning system in agricultural engineering[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2020, 58(7): 143-144.

[5] 张雁. 水田环境下的无人农机自动驾驶与作业系统研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
ZHANG Y. Research on autonomous driving and operation system of unmanned agricultural machines in paddy field environment[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University. 2019.

[6] 熊璐, 杨兴, 卓桂荣, 等. 无人驾驶车辆的运动控制发展现状综述[J]. 机械工程学报, 2020, 56(10): 127-143.
XIONG L, YANG X, ZHUO G, et al. Review on the development of motion control of unmanned vehicle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(10): 127-143.

[7] SONG X, SHAO Y, QU Z. A vehicle trajectory tracking method with a time-varying model based on the model predictive control[J]. IEEE Access, 2020, 8: 16573-16583.

[8] LIU S, HOU Z, TIAN T, et al. A novel dual successive projection-based model-free adaptive control method and application to an autonomous car[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2019, 30(11): 3444-3457.

[9] LENAIN R, THUILOT B, CARIOU C , et al. Mobile robot control in presence of sliding: Application to agricultural vehicle path tracking[C]// The 45th IEEE Conference on Decision and Control, San Diego, CA. Piscataway, New York, USA: IEEE, 2006: 6004-6009.

[10] 张华强, 王国栋, 吕云飞, 等. 基于改进纯追踪模型的农机路径跟踪算法研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 18-25.
ZHANG H, WANG G, LYU Y, et al. Research on path tracking algorithm of agricultural machinery based on improved pure tracking model[J]. Transactions of the CSAM, 2020, 51(9): 18-25.

[11] 王辉, 王桂民, 罗锡文, 等. 基于预瞄追踪模型的农机导航路径跟踪控制方法[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 11-19.
WAGN H, WANG G, LUO X, et al. Tracking control method of agricultural machinery navigation path based on preview tracking model[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(4): 11-19.

[12] 刘兆朋, 张智刚, 罗锡文, 等. 雷沃ZP9500高地隙喷雾机的GNSS自动导航作业系统设计[J]. 农业工程学报, 2018, 34(1): 15-21.
LIU Z, ZHANG Z, LUO X, et al. Design of GNSS automatic navigation operation system for Leiwo ZP9500 high ground clearance sprayer[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(1): 15-21.

[13] 白国星, 刘丽, 孟宇, 等. 基于非线性模型预测控制的移动机器人实时路径跟踪[J]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 47-52, 60.
BAI G, LIU L, MENG Y, et al. Real-time path tracking of mobile robot based on nonlinear model predictive control[J]. Transactions of the CSAM, 2020, 51(9): 47-52, 60.

[14] 刘正铎, 张万枝, 吕钊钦, 等. 基于非线性模型的农用车路径跟踪控制器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 23-30.
LIU Z, ZHANG W, LYU Z, et al. Design and test of path tracking controller for agricultural vehicle based on nonlinear model[J]. Transactions of the CSAM, 2018, 49(7): 23-30.

[15] 沈跃, 何思伟, 刘慧, 等. 高地隙喷雾机自转向电动底盘控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 385-392, 402.
SHEN Y, HE S, LIU H, et al. Design and test of self-steering electric chassis control system for highland gap sprayer[J]. Transactions of the CSAM, 2020, 51(11): 385-392, 402.

[16] 邱恒浪. 基于轮毂电机的四轮驱动差速转向控制系统的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2012.
QIU H. Research on four wheel drive differential steering control system based on hub motor[D]. Chongqing: Southeast University, 2012.

[17] YOON S, JEON H, KUM D. Predictive cruise control using radial basis function network-based vehicle motion prediction and chance constrained model predictive control[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(10): 3832-3843.

[18] TANG Z, XU X, WANG F, et al. Coordinated control for path following of two-wheel independently actuated autonomous ground vehicle[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2019, 13(4): 628-635.

[19] 刘洋, 于树友, 郭洋, 等. 基于滚动时域优化的轮式移动机器人路径跟踪问题研究[J]. 控制理论与应用, 2017, 34(4): 424-432.
LIU Y, YU S, GUO Y, et al. Model predictive control based on extended state observer for vehicle yaw stability[J]. Control Theory & Applications, 2017, 34(4): 424-432.

[20] 刘涵, 李涛, 聂彦鑫, 等. 基于预测滑转率的转矩分配策略研究[J]. 汽车技术, 2020, 540(9): 39-44.
LIU H, LI T, NIE Y, et al. Research on torque allocation strategy based on predicted sliding ratio[J]. Automotive Technology, 2020, 540(9): 39-44.

[21] 李升波, 王建强, 李克强. 软约束线性模型预测控制系统的稳定性方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(11): 1848-1852.
LI S, WANG J, LI K. Stability method of soft-constrained linear model predictive control system[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2010, 50(11): 1848-1852.

[22] 刘勇兰, 顾若波, 王渝. 高地隙自走式喷杆喷雾机的发展趋势及产业化前景分析[J]. 时代农机, 2018, 45(9): 36-37.
LIU Y, GU R, WANG Y. Development trend and industrialization prospect analysis of self-propelled boom sprayer with high ground clearance[J]. Times Agricultural Machinery, 2018, 45(9): 36-37.

[23] 毛家稳, 周俊, 梁洋洋. 电驱动高地隙车辆滑转率滑模控制研究[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(2):

129-134.
MAO J, ZHOU J, LIANG Y. Research on sliding mode control of slip ratio of electrically driven vehicles with high ground gap[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(2): 129-134.
[24] 张文春, 徐立友 . 汽车理论(第 3 版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
ZHANG W, XU L. Automobile theory(3rd edition)[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2018.
[25] 沈俊, 宋健 . 随机不平路面上的ABS制动研究[J]. 汽车工程, 2007(3): 230-233, 237.
SHEN J, SONG J. Research on ABS braking on random uneven roads[J]. Automotive Engineering, 2007 (3): 230-233, 237.
[26] 王麒淦 . 高地隙喷雾机行驶稳定性动力学建模与仿真研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2020.
WANG Q. Research on dynamic modeling and simulation of driving stability of high ground clearance sprayer[D]. Shihezi: Shihezi University, 2020.

Path Following Model Predictive Control of Four Wheel Independent Drive High Ground Clearance Sprayer

WANG Zijie, LIU Guohai*, ZHANG Duo, SHEN Yue, YAO Zhen, ZHANG He

(*School of Electrical and Information Engineering*, *Jiangsu University*, *Zhenjiang*, 212013, *China*)

Abstract: In order to solve the problems of low transmission efficiency, high carbon emissions, environmental pollution, low intelligence, and poor flexibility in traditional fuel-driven and front-wheel steering high ground clearance sprayers, a new type of high ground clearance four-wheel independent drive (4WID) sprayer which was suitable for the unmanned driving was proposed in this research. The sprayer adopted the hybrid power of fuel and battery and was steered by the 4WID driving mode of the front and rear double steering axles. For this reason, the turning radius of the proposed 4WID sprayer was small, and the running track of the front and rear wheels were uniform in height, which reduced the phenomenon of seedling crushing during field plant protection operations. Considering the slippage and sinking of the driving wheel in the extremely complex operating environment of the paddy field, based on the linear time-varying kinematics model (LTV) of the sprayer, a layered path tracking control considering the slippage of the driving wheel was constructed. The upper model predictive controller (MPC) obtained the steering angle and movement speed of the sprayer according to the expected path and the current position of the vehicle to realize path tracking. The lower layer used fuzzy control and integral separation PID control to construct a driving wheel slip controller, so as to achieve effective control of path tracking, speed, and driving wheel slip, which improved the stability and path tracking accuracy of the sprayer in a complex operating environment. The co-simulation results of Adams and Matlab showed that under complex working conditions, the slip rate of the driving wheel of the sprayer was controlled within ±20%, so as to prevent excessive slip of the driving wheel from having adverse effects on the speed and steering angle, which was conducive to the improvement of the stability of the sprayer. The sprayer could be tracked quickly and accurately the desired path, the path tracking in road conditions outside attached coefficients were 0.3 and 0.7 of the lateral deviation could be controlled within ±0.018 m. In stage C roughness 3D road conditions, the sprayer could adjust the steering angle of the front wheels in time to stabilize the body posture and the lateral deviation could be controlled within ±0.054 m. Compared with the controller that didn't consider the slip of the driving wheel, the stability and path tracking accuracy of the sprayer had been significantly improved.

Key words: front and rear double steering axles; four-wheel independent drive; model predictive control; fuzzy control; slip; path tracking